

УДК 681.3

## Обзор методов препроцессинга облаков точек в задачах анализа результатов лазерного сканирования объектов капитального строительства

Петросян Артур Владимирович

Бурков Павел Викторович (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*Представлены современные алгоритмы и методы для обработки облаков точек. Обсуждаются ключевые аспекты, связанные с удалением шумов, регистрацией точек, обнаружением форм, поверхностной реконструкцией, а также предлагаются эффективные подходы к повышению точности и скорости обработки данных. Приведены математические постановки решения соответствующих задач. Рассмотрено использование приведенных алгоритмов и методов для решения задач в области жизненного цикла объектов капитального строительства и анализа проектных решений в системах управления строительными проектами.*

**Ключевые слова:** объект капитального строительства, жизненный цикл, лазерное сканирование, облако точек, регистрация точек, поверхностная реконструкция

**Введение.** Лазерное сканирование на сегодняшний день приобрело актуальность в связи с возможностью его использования в градостроительной сфере, а именно в строительном контроле — комплексе мероприятий, направленных на обеспечение качества выполнения строительно-монтажных работ и соответствия проектной документации.

Благодаря такому сканированию и с помощью специализированных систем автоматизированного проектирования возможно сопоставить трехмерную модель объекта капитального строительства с его результатом, сравнить отклонения и проанализировать на соответствие проектной документации (трехмерная модель) [1]. Однако для таких операций необходимо провести предварительные обработки над результатами лазерного сканирования.

**Понятие облака точек.** Одно из целей лазерного сканирования является получения объемной модели окружающего сканера пространства. Результатом сканирования является облако точек — набора точек в виде координат. Система координат и ее параметры задаются в поставляемом программном обеспечении сканера. Более профессиональные сканеры могут также вычислить цвет точки, интенсивность и другие параметры.

Принцип работы заключается в измерении времени, за которое лазерный импульс достигает поверхности объекта и возвращается обратно, и регистрации направлений лазерного луча (вертикального и горизонтального угла). Время преобразуется в расстояние, и с помощью направлений система получает единичное измерение — точку.

Результат облака точек можно сохранить в различных форматах данных — от простых текстовых (.txt, .xyz, .pts) до сложных бинарных (.e57, .las).

**Предварительная обработка облаков точек. Алгоритм удаления статистических выбросов.** При начальном сканировании результатом являются т. н. сырые точки (англ. raw point data) — во время процесса были выявлены лишние точки (шумы), которые не принадлежат сцене или отсутствуют в среде, ввиду помех и погрешностей сканера. Лишние данные могут привести к неточностям в будущем. Поскольку точки — набор численных данных, то для исключения лишних данных (точек выброса) можно воспользоваться статистическими методами. Одним из предложенных таких методов — алгоритм удаления статистических выбросов (англ. SOR, Statistical outlier removal) [2]. Пусть  $P = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$  — набор из  $n$  точек, тогда для определения точек выбросов необходимо:

- вычислить для каждой точки расстояние  $d_i$  до ее  $k$  ближайших соседей;
  - найти среднее  $\mu$  и стандартное отклонение  $\sigma$  расстояний  $D = \{d_i\}_{i=1}^N$ ;
  - классифицировать выбросы:  $\Omega = \mu + t * \sigma$ , где  $t$  — заданный множитель стандартного отклонения;
  - если  $d_i > \Omega$ , то точка  $p_i$  является выбросом (шумом).
- Пример работы алгоритма проиллюстрирован на рис. 1.

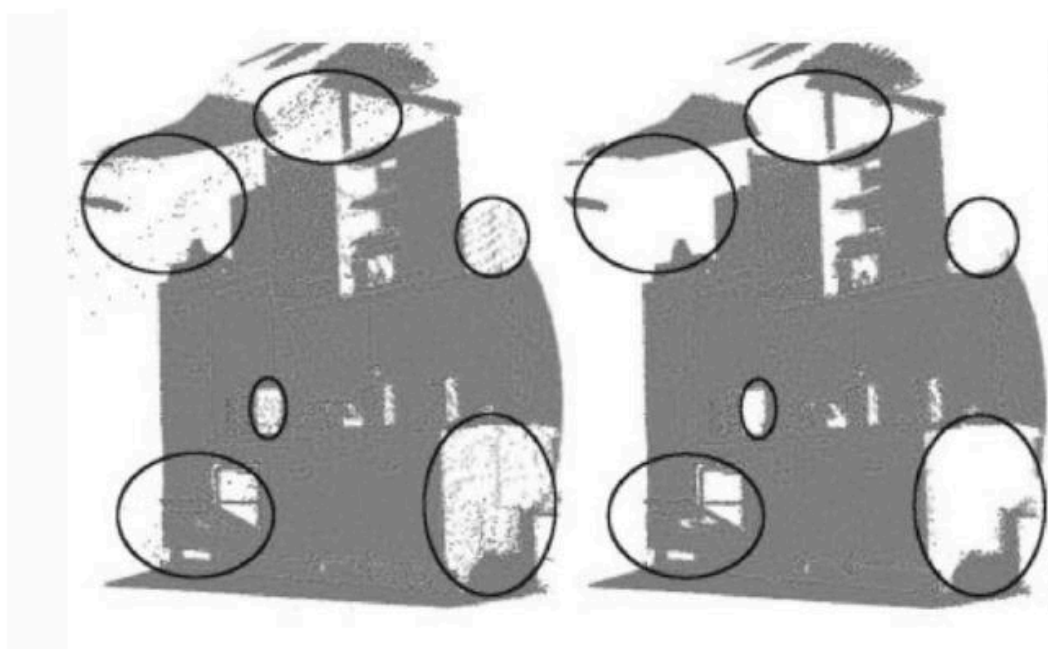


Рис. 1. Облако точек с шумами (слева) и без (справа)

**Регистрация точек.** Регистрация облаков точек — это процесс выравнивания двух или более облаков точек той же сцены. Наземный сканер ограничен в исследование пространства, поэтому для сканирования достаточно массивного участка необходимо менять его расположение, провести повторный скан с другого ракурса и объединить несколько сканов в один. Современные лазерные сканеры производят такую обработку до вывода в формат данных.

На рис. 2 изображен результат исполнения подобных алгоритмов после сканировании комнаты с нескольких ракурсов.

Математическая задача регистрации точек заключается в том, чтобы вычислить такую матрицу перехода  $T$ , при которой два облака точек с большой точностью выравнены относительно друг друга, т. е. минимизация некоторой функции  $E(T)$ .



Рис. 2. Несколько сканов (сверху) и объединенные сканы (снизу)

Для решения задач выравнивания точек можно использовать методы линейной алгебры, например алгоритм Кабша [3], который вычисляет оптимальную матрицу поворота  $R$ , а в качестве минимизирующей функции является среднеквадратичное отклонение между двумя наборами точек  $P = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$  и  $Q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ :

$$E(R) = \sum_{i=1}^N \|p_i - Rq_i\|^2 \rightarrow \min.$$

Шаги алгоритма Кабша:

- 1) сопоставить центр тяжести наборов точек с началом системы координат;
- 2) вычислить матрицу ковариаций  $H = P^T Q$ ;
- 3) вычислить матрицу перехода  $R = \sqrt{H^T H} \times H^{-1}$ .

Однако такой алгоритм обладает недостатками. Во-первых, он является прямым, поэтому не всегда можно получить оптимальную минимизацию за один проход. Во-вторых, наилучшее приближение функции существенно зависит от взаимного расположения точек относительно друг друга. Более того, количество точек должно быть одинаковым.

Использование современных алгоритмов позволяет исправить вышеуказанные недостатки. Самым популярным алгоритмом является итерационный алгоритм совмещения ближайших точек (англ. ICP, Iterative Closest Point). Данный алгоритм имеет множество типов и модификаций. Классический алгоритм предполагает сравнение «точка с точкой» (Point-to-Point ICP) [4, 5]. Здесь в качестве задачи поиска является матрица перехода  $T$ , а функция:

$$E(T) = \sum_{(p,q) \in K} ||p - Tq||^2 \rightarrow \min$$

подвергается оценке на каждом шаге итерации.

Шаги алгоритма ICP:

- 1) найти -ближайших соседей для двух наборов точек  $P$  и  $Q$ ;
- 2) оставить набор «соседствующих» точек  $K = \{(p, q)\}$ ;
- 3) вычислить матрицу перехода  $T$ , предварительно вычислив матрицу поворота и переноса;
- 4) применить преобразование для набора точек  $Q$ ;
- 5) повторить шаги 1–4, пока  $E(T) > \tau$ , где  $\tau > 0$  — заданная точность.

На рис. 3 представлен пример работы алгоритма ICP — два набора точек удалось выровнять за 25 итераций.

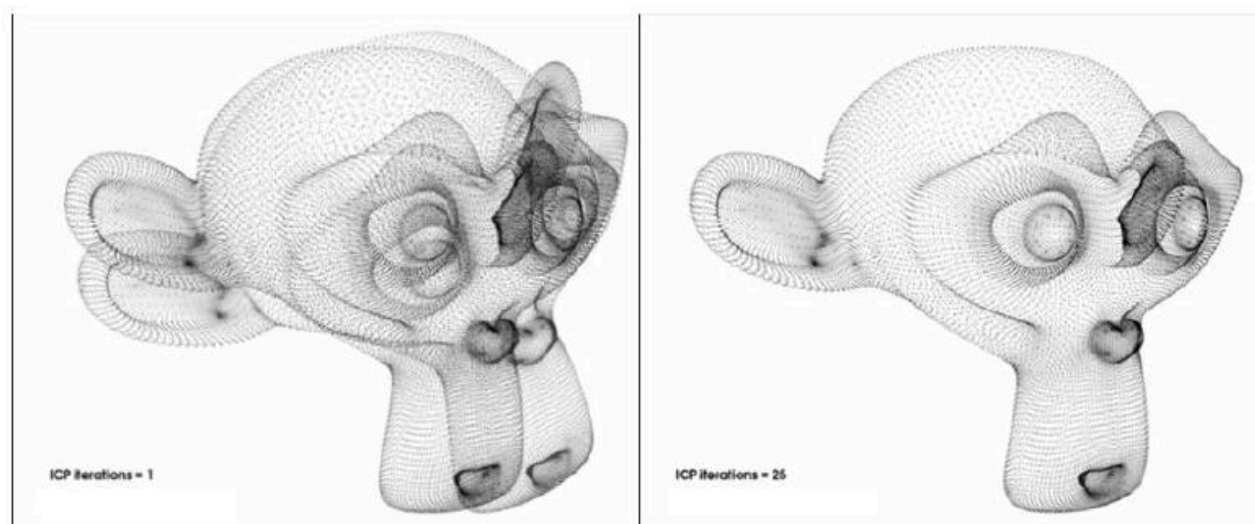


Рис. 3. Пример работы алгоритма ICP

**Обнаружение геометрических форм.** Зачастую необходимо лишь на основе облака точек выявлять простые геометрические примитивы. Такая

необходимость, например, возникает для автономных систем — обнаружение знаков, разметок, людей или других объектов.

Облака точек можно рассматривать как набор случайных данных и здесь также можно применить методы статистики и теории вероятностей. Широко используемым алгоритмом считается (Efficient) RANSAC for Point Cloud Shape Detection (или просто Efficient RANSAC) [6]. В основе данного алгоритма лежит парадигма RANSAC (англ. аббр. RANdom SAmple Consensus) — стабильный метод оценки параметров модели на основе случайных выборок. Благодаря такой парадигме можно выявить форму объекта и с учетом многочисленных шумов (более 50 %). Рассмотрим алгоритм подробнее. Пусть  $P(X)$  — вероятность события,  $\mathcal{P} = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$  — набор точек,  $\tau$  — минимальный размер формы,  $p_t$  — заданная минимальная вероятность на выбор кандидата,  $m$  — геометрическая форма. Тогда шаги алгоритма Efficient RANSAC в общем виде:

- 1) инициализировать множество кандидатов  $C$  и множество извлеченных форм  $\Psi$ ;
- 2) выбрать лучший кандидат  $m$  из множества  $C$ ;
- 3) проверить условие: если  $(P(|m|, |C|) > p_t)$ :
  - удалить точки, соответствующие форме  $m$  из облака  $\mathcal{P}$ ;
  - добавить найденную форму  $m$  в множество извлеченных форм  $\Psi$ ;
  - удалить остальные кандидаты из множества кандидатов  $C$ ;
- 4) обновить множество кандидатов  $C$ , добавляя новые кандидаты;
- 5) критерий остановки:  $P(\tau, |C|) \leq p_t$ , иначе повторить шаги 2–5.

Необходимо отметить, что выборка форм и расчет вероятностей зависит от поиска требуемых примитивов: плоскости, сферы, тора, цилиндра и т. д. Так, например, для плоскости, параметры сравнения — минимум три точки и среднее отклонение угла формы от точек. На рис. 4 проиллюстрированы обнаруженные формы.

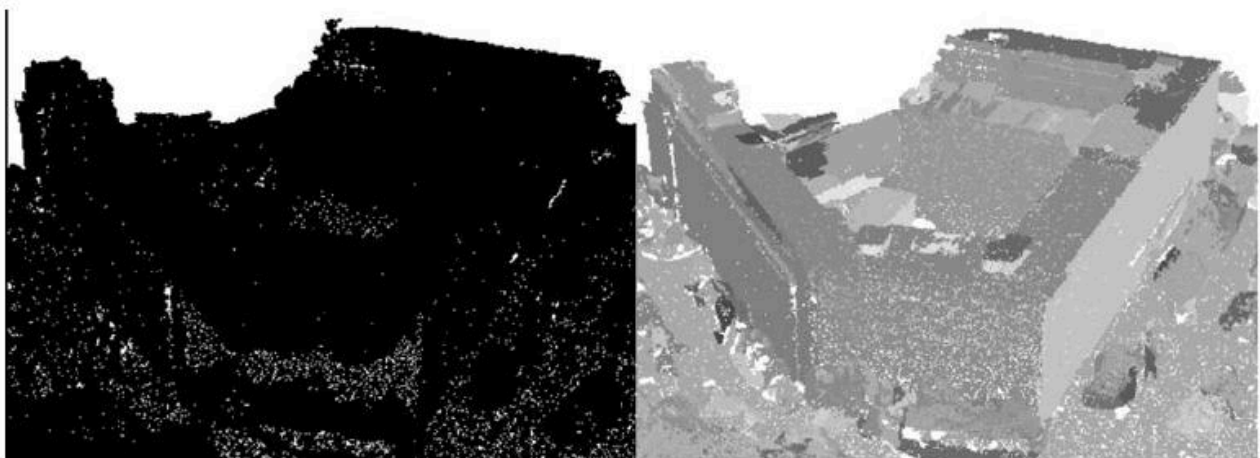


Рис. 4. Пример работы алгоритма Efficient RANSAC

**Полигональная реконструкция (триангуляция) поверхности.** Обнаружение форм может быть недостаточно для определения геометрии объекта.

Более того, реконструкция геометрии объекта на основе только облака точек может быть социально-культурно важно: на основе результатов лазерного сканирования до произошедшего пожара была спроектирована трехмерная модель собора Парижской Богоматери, что помогло в дальнейшем его восстановить [7].

Реконструкция поверхности из наборов точек часто является последовательным процессом, состоящим из следующих шагов [8]:

- сканирование и выравнивание сканов приводят к получению набора точек или точек с нормальными векторами;
- удаление выбросов;
- упрощение для уменьшения количества входных точек;
- сглаживание для уменьшения шума в исходных данных;
- оценка нормалей и их ориентации, если нормали не были заранее предоставлены устройством для получения данных;
- реконструкция (триангуляция) поверхности.

Одним из эффективных алгоритмов реконструкции является полигональная реконструкция Пуассона [8] (англ. Poisson surface reconstruction). Алгоритм решает задачу нахождения приближенной индикаторной функции предполагаемого твердого тела, градиент которой наилучшим образом соответствует входным нормальным векторам. Поиск неявной функции осуществляется через уравнение Пуассона для каждой вершины, используя решение разреженных систем линейных уравнений

$$\Delta f = \operatorname{div}(\mathbf{n}),$$

где  $n$  — размерность поля. Результат виден на рис. 5.

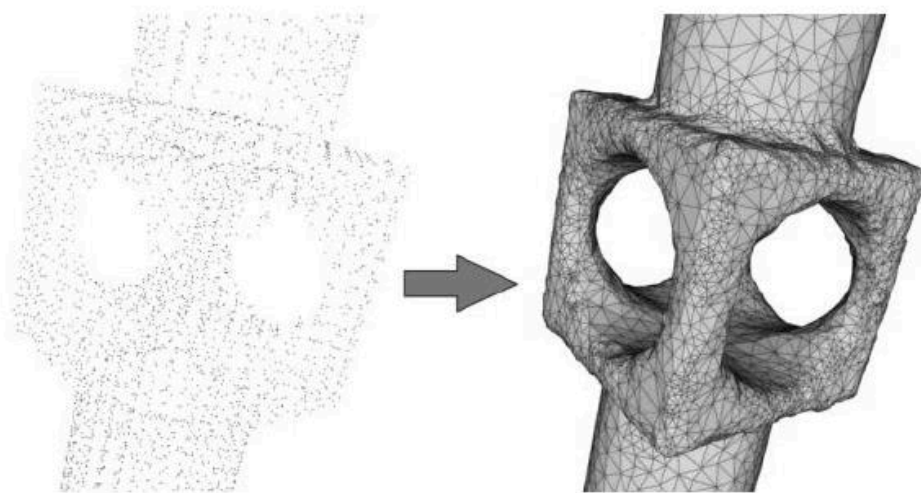


Рис. 5. Пример работы реконструкции Пуассона

Однако такая реконструкция основана на триангуляции Делоне и эффективно справляется только с реконструкцией гладких поверхностей, что не подходит для работы с объектами капитального строительства (домов, эта-

жей, комнат) — такие объекты имеют резкие выступы и углы. Для решения таких задач предлагается метод, который основан на обнаружении геометрических форм — PolyFit (Polygonal Surface Reconstruction) [9]. Основной задачей является минимизация функции полученных граней после обнаружения форм и их реконструкции

$$\min_x (\lambda_f E_f \lambda_m E_m \lambda_c E_c),$$

где  $\lambda_f, \lambda_m, \lambda_c$  — соответствующие коэффициенты;  $E_f$  — аппроксимация граней;  $E_c$  — плотность точек на грани;  $E_m$  — детализация модели. Процесс работы алгоритма изображен на рис. 6.

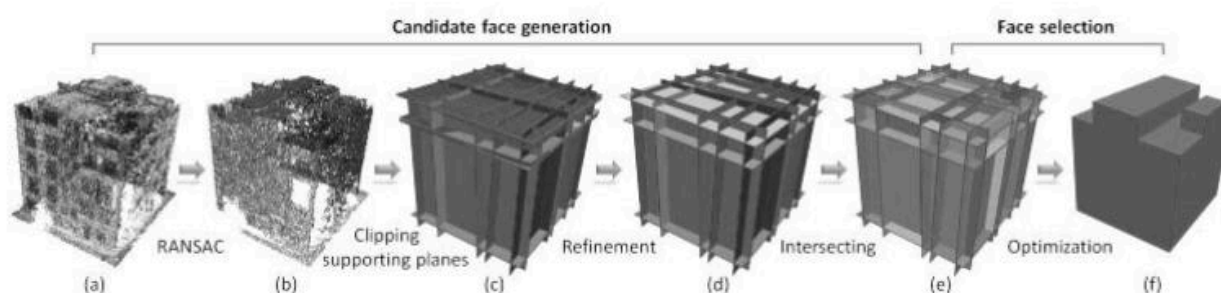


Рис. 6. Шаги алгоритма PolyFit

Стоит отметить, что оптимизация предполагает решение задач линейного программирования и эффективность, и скорость работы алгоритма (в части реконструкции) зависит от выбранного программного оптимизатора. В таблице представлена модель, ее сложность, выбранный оптимизатор и время реконструкции.

Время реконструкции при различных оптимизаторах

| Модель                                                                              | Количество точек/полигонов | Время работы (в секундах) |     |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----|------|------|
|                                                                                     |                            | Оптимизатор               |     |      |      |
|                                                                                     |                            | Gurobi                    | CBC | SCIP | GLPK |
|  | 215556/442191              | 2                         | 7,5 | 9    | –    |

**Закключение.** Приведенные методы препроцессинга облаков точек представляют собой мощные инструменты для решения сложных задач в областях градостроения и строительного контроля. Эффективные подходы, направленные на удаление шумов, регистрацию точек и улучшение точности обра-

ботки данных, позволяют значительно ускорить рабочий процесс и повысить качество проектных решений в задачах анализа результатов лазерного сканирования объектов капитального строительства, в частности реконструкции их трехмерной модели.

## Литература

- [1] Neuroject. *Лазерное сканирование в строительстве*. URL: <https://neuroject.com/laser-scanning-in-construction/> (дата обращения 25.04.2025).
- [2] Statistical Outlier Removal. URL: [https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/statistical\\_outlier.html](https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/statistical_outlier.html) (дата обращения 22.04.2025).
- [3] Kabsch W. A solution for the best rotation to relate two sets of vectors. *Acta Cryst A*, 1976, vol. 32, art. no. 9223.
- [4] Besl P.J., McKay N.D. A Method for Registration of 3D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, vol. 14 (2), pp. 239–256.
- [5] ICP *регистрация* в Open3D. URL: [https://www.open3d.org/docs/release/tutorial/t\\_pipelines/t\\_icp\\_registration.html#Point-To-Point-ICP-Registration](https://www.open3d.org/docs/release/tutorial/t_pipelines/t_icp_registration.html#Point-To-Point-ICP-Registration) (accessed 22.04.2025).
- [6] Schnabel R., Wahl R., Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. *Computer graphics forum*, 2007, vol. 26, pp. 214–226.
- [7] iQB Technologies. *3D-сканер FARO в проекте восстановления Нотр-Дам-де-Пари*. URL: <https://blog.iqb.ru/faro-3d-scanner-notre-dame/> (дата обращения 25.04.2025).
- [8] *Реконструкция поверхности с использованием метода Пуассона*. URL: [https://doc.cgal.org/latest/Poisson\\_surface\\_reconstruction\\_3/index.html](https://doc.cgal.org/latest/Poisson_surface_reconstruction_3/index.html) (дата обращения 22.04.2025).
- [9] *Полигональная реконструкция поверхности (PolyFit)*. URL: [https://doc.cgal.org/latest/Polygonal\\_surface\\_reconstruction/index.html](https://doc.cgal.org/latest/Polygonal_surface_reconstruction/index.html) (дата обращения 22.04.2025).

## Point cloud preprocessing in tasks analysis of laser scan results of construction projects

Petrosyan Artur Vladimirovich

Burkov Pavel Viktorovich (*scientific advisor*)

*BMSTU, Moscow, Russia*

Article presents algorithms and methods for point cloud preprocessing to analyze results of laser scan. Key aspects related to noises removal, shape detection, surface reconstruction, moreover efficient ways to increase accuracy and speed of data processing are offered. Solutions to mathematical issues are presented. Additionally, usage of mentioned algorithms in solving tasks of construction project lifecycle and project solution analysis in construction projects control systems are shown.

**Keywords:** construction project, construction project lifecycle, laser scan, point cloud, points registration, surface reconstruction